

数値流体解析を用いた迎角を有する 1:4 角柱の空力特性の把握

○中央大学 学生員 栗林 伶二 中央大学 正会員 平野 廣和
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

近年、橋梁断面の開発において耐風安定性が期待される辺長断面比 $B/D=4.0$ (B:桁幅, D:桁高) の箱型断面を組み合わせた構造が提案されている. この箱型断面は、迎角 $\alpha=0^\circ$ 時に前縁で剥離した流れ場が $B/D=2.8$ 付近に再付着することが知られている. さらに、この断面が迎角を有した場合、ある一定の迎角の領域から完全剥離型へ移行することが知られている. 剥離した流れが完全剥離するか、物体側面に再付着するかによって、流れの状態、圧力分布、挙動が大きく変化する. よって、迎角を変更した際の流れの状態を把握することは橋梁断面開発において重要な点である. また、ストローハル数(以下 S_t)の変化は流れの再付着点変化に伴う流れの状態を表すため、迎角変化時の S_t を示すことで流れの状態を再現することも重要となる.

そこで本研究は、断面辺長比 $B/D=4.0$ の一箱型断面において数値流体解析(CFD: Computational Fluid Dynamics)による 2 次元の静的解析を行い、続いて 3 次元解析による静的解析を行う. それにより、2 次元解析と 3 次元解析の結果を比較し、辺長断面比 $B/D=4.0$ の断面が迎角を有した場合のそれぞれの流れの状態を確認し、再付着型から完全剥離型への変化の空力特性を把握することを目的とする.

2. 解析手法

断面辺長比 $B/D=4.0$ の一箱型断面において 3 次元解析を行う. 本数値流体解析には丸岡ら¹⁾が提案している IBTD/FS 有限要素法を適用している. 乱流モデルは 2 次元解析には RANS(Reynolds Averaged Navier Stokes equation)の SA(Spalart-Allmaras)モデルを採用する. また、3 次元解析には LES(Large-Eddy-Simulation)の Smagorinsky モデルを採用する.

(1) 支配方程式と連続式

流れ場の支配方程式は、LES によりフィルターをかけられた非圧縮性 Navier-Stokes 運動方程式を用いる. フィルターをかけた非圧縮性流れの運動方程式(1)と連続式(2)は、それぞれ次式のように表される.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-\tau_{ij} + 2\nu \bar{D}_{ij} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (2)$$

(2) 解析条件

本研究で用いた辺長断面比 $B/D=4.0$ の断面形状を図-1 に示す. また、図-2 に座標系と解析領域を、表-1 に 2 次元、3 次元解析の解析諸元を示す. 境界条件は、 Γ_1 で代表流速である一様流速 1.0、 Γ_2 では移流境界条件とする. Γ_3 で slip 条件、物体表面の Γ_4 で no-slip 条

件とし、断面軸方向の境界 Γ_5 では周期境界条件を用いている. また、解析する迎角は、静的な解析で迎角 $\alpha=0^\circ$ を中心として、迎角 1.0° ピッチで行う. また、2 次元解析では迎角 $\alpha=-10^\circ \sim 10^\circ$ 、3 次元解析では迎角 $\alpha=-8^\circ \sim 8^\circ$ で行う.

表-1 解析諸元

	2次元解析	3次元解析
時間増分 Δt	0.05D/U	0.05D/U
対象断面 B/D	4.0	4.0
接点数	14282	17816 × 33
要素数	14048	17552 × 32
乱流モデル	RANSのSA	LESのSGS
Reynolds数	5000	15000
軸方向長さ		3.2D
軸方向分割		32
軸方向幅		0.1D
モデル定数 C_s		0.1
迎角	$\alpha = -10 \sim 10^\circ$	$\alpha = -8 \sim 8^\circ$

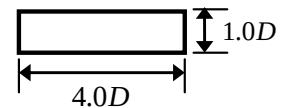


図-1 対象断面

3. 解析結果

(1) 静的空気力係数

図-3 に平均抗力係数 C_d 、平均揚力係数 C_l 、平均空力モーメント係数 C_m の 2 次元解析、3 次元解析の迎角変化

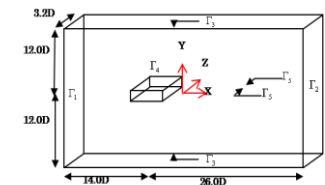


図-2 解析領域

時の静的解析結果及び実験結果を示す. なお、参考とした実験値²⁾のレイノルズ数 Re は 85,000 である. ここで、図-3(a)の C_d においては各迎角で 3 次元解析の結果は実験値とほぼ等しい値を示している. また、図-3(b), (c)の C_l と C_m で負勾配を示している点に関しては、ギャロッピング振動の発現の可能性が考えられる. この発現の可能性は実験でも確認されている.

一方で、迎角 $\alpha=4^\circ \sim 6^\circ$ の流れの状態が変化する高迎角領域において、解析結果に実験値との若干の乖離が見られる. この点に関しては、2 次元解析では橋軸方向(スパン方向)のエネルギー散逸を考慮していないので、剥離渦が強めに評価される. このため、流れを正確に再現できなくなり、再付着点のずれが生じ、その結果、空気力が過大に評価されたと考えられる.

(2) 流線図での検証

図-4 に迎角変化時の時間平均流線図を示す. ここでは流れの状態が再付着型から完全剥離型へと変化する点に着目する. 2 次元解析と 3 次元解析ではそれぞれの流線図で、各迎角での断面下面の再付着点位置が 3 次元解析の方が断面後方で再付着をしており、その位置が異なっている. この断面下面での再付着点の不一致が解析結果に違いをもたらしたと考えられる. また、図-3 で見られる高迎角領域での空気力係数の実験値と 3 次元解析結果の乖離に関しては、図-4 で見られる断面後面の剥離、再付着が若干であるが断面と付着して

キーワード: 数値流体解析 静的空気力係数

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel. 03-3817-1816

fax. 03-3817-1803

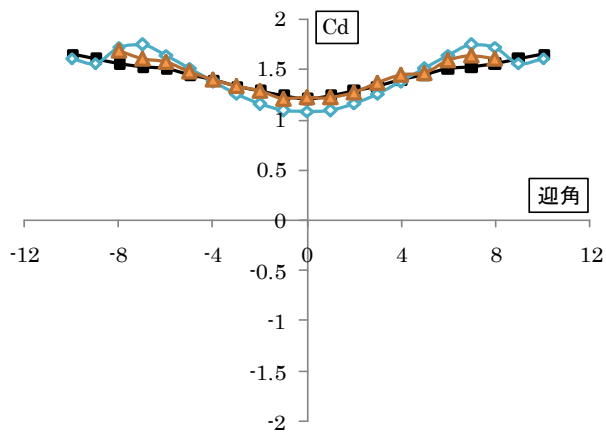
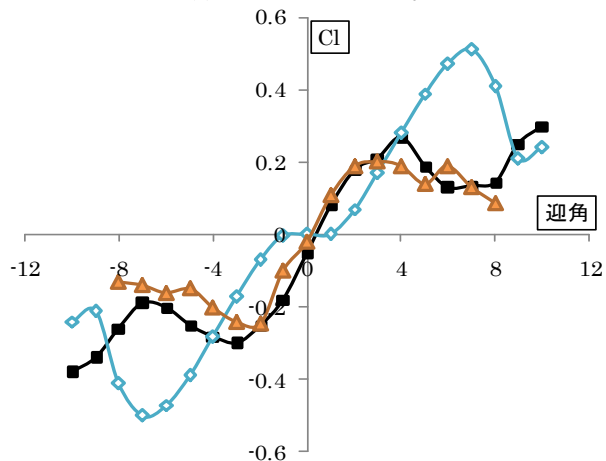
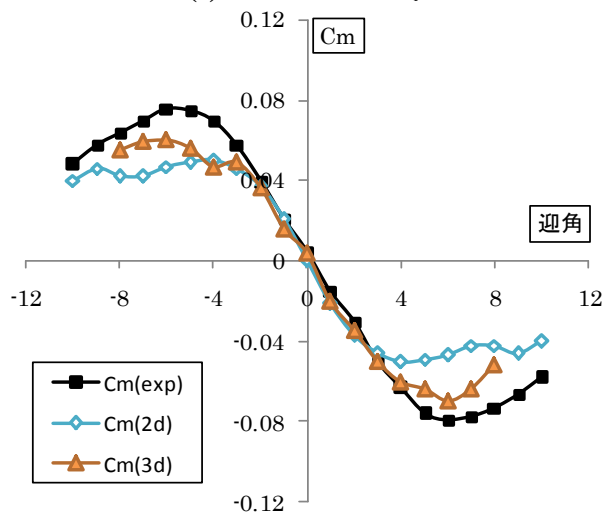
(a) 平均抗力係数 C_d (b) 平均揚力係数 C_l (c) 平均空力モーメント係数 C_m

図-3 迎角変化における静的空気力係数の実験値との比較

いないことが原因と考えられる。流れが複雑となる高迎角領域での流れの剥離や再付着は、角柱断面の空気力に大きな変化をもたらすため、解析結果にも影響を及ぼす。つまり、この点が実験値と3次元解析結果の乖離を生じた原因と考えられる。

(3) ストローハル数 S_t での検証

図-5に2次元解析と3次元解析の迎角変化と S_t の結果を示す。既存の実験での S_t (迎角 $\alpha=3^\circ$ 時) は0.13であることから、迎角 $\alpha=3^\circ$ まではどちらの解析結果も良い精度であると考えられる。一方で、迎角 $\alpha=3^\circ$ から $\alpha=4^\circ$ に角度が変わる点では、2次元解析では迎角が変化しても S_t がほぼ一定の値を示しているのに対し、3

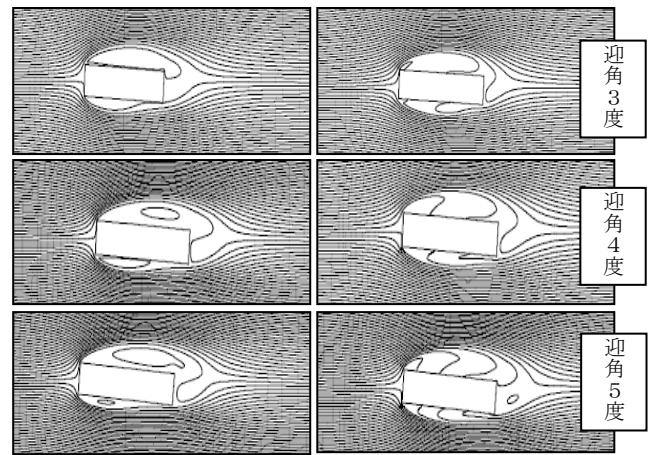


図-4 迎角変化時の時間平均流線図

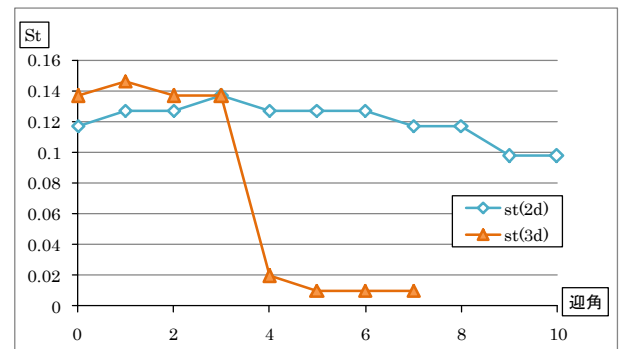


図-5 迎角とストローハル数の関係

次元解析では S_t が大きく変化している。この S_t の変化は、角柱前縁で剥離した流れが物体表面に再付着していた状態から完全剥離型に変化したことによると考えられる。具体的には、 $B/D=4.0$ の断面では迎角 $\alpha=3^\circ \sim 4^\circ$ にかけて再付着点が断面上面から断面後面に変化していると考えられる。

4. おわりに

本研究では、辺長断面比 $B/D=4.0$ の一箱桁断面において、迎角変化に伴う空力特性を、CFDを用いて2次元解析、3次元解析を行うことで把握した。これにより、流線図より流れ場の状態変化を可視的に再現し、時間平均による空気力係数を算出することで箱桁断面にかかる静的空気力を把握した。また、迎角変化時の流れでは流線図と S_t に着目することで、 $B/D=4.0$ の一箱桁断面が再付着型から完全剥離型へと変化する流れの変化を確認できた。

今後の課題は、対象断面をフラッター安定性が期待されている $B/D=4.0$ の断面を組み合わせた二箱桁断面に変更し、同様に空力特性を検討していく。

〈参考文献〉

- 1) 丸岡晃, 太田真二, 平野廣和, 川原陸人: 同時補間を用いた陰的有限要素法による非圧縮性流れの解析, 構造工学論文集, Vol.43A, pp.383-394, 1997.4.
- 2) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃: 矩形断面 (断面辺長比 1:4) の迎角変化にともなう空力特性に関する数値流体解析, 計算工学講演会論文集, Vol.6, 2001
- 3) 平野廣和, 渡邊茂, 丸岡晃, 佐野健一: 断面辺長比 4 の矩形断面の空力特性に関する 2 次元・3 次元数値流体解, 土木学会論文集, Vol.598/I-44, pp.401-411, 1998.7